



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Rapport om

modelforsøg - Bagenkop Havn

Burcharth, Hans F.; Brorsen, Michael; Frigaard, Peter

Publication date:
1993

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Burcharth, H. F., Brorsen, M., & Frigaard, P. (1993). *Rapport om: modelforsøg - Bagenkop Havn*. Aalborg Universitetscenter, Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LABORATORIET FOR HYDRAULIK OG HAVNEBYGNING
INSTITUTTET FOR VAND, JORD OG MILJØTEKNIK
AUC, Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg

Rapport om
MODELFORSØG
BAGENKOP HAVN
Februar 1993

Marts 1993

Rettelsesblad

Hovedrapport

- s 4 linie 2-3 (refleksionskoefficienten af bølgehøjden var ca. 50%)
- (refleksionskoefficienten målt som bølgehøjdereduktion var 50-70%).
- s 16 figur 5f 30 m på figuren ændres til 45 m
- s 18 linie 6 undersøgte vindretninger.
- undersøgte vindretninger svarende til en overskridelseshyppighed på 12 timer pr. år.

Bilagsrapport

- Bilag 0.02 : Længden af energiabsorberende konstruktion målsættes til 60 m.
- Bilag 4.137 : Bilagsnummeret er 4.131.
- Bilag 4.131 : 300° → 330°
Bilagsnummeret ændres til 4.137.
- Bilag 5 side 29 : I tabel 5.2 ændres 270 (NV) til 270 (V).
- Bilag 5 side 41 linie 13 : Bilag 5.3 → Bilag 5.4.

1 Indledning

På foranledning af Sydlangelands Kommune har laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, AUC, udført modelforsøg til bestemmelse af bølgeforholdene i Bagenkop Havn.

Begrundelsen for modelforsøgene har været ønsket om at finde konstruktionsmæssige foranstaltninger, som vil kunne mindske bølgeuroen i de inderste bassiner. Som led i modelforsøgene blev foretaget en optimering af forskellige bølgeabsorberende konstruktioner.

Ledelse af undersøgelserne og rapportering er forestået af ingeniørdocent Hans Falk Burcharth, lektor civ.ing. Michael Brorsen samt adjunkt civ.ing. Peter Frigaard.

Modelarbejdet er udført af laboranterne Jørgen S. Sørensen, Niels Drustrup, Werner Nielsen og Jens Pedersen.

I forbindelse med undersøgelserne er der efter kontraktindgåelse ultimo maj 1992 afholdt følgende møder:

Den 17.6.1992 besigtigelse af indledende modelforsøg omhandlende bølgeabsorberende konstruktioner. På mødet deltog:

Peter B. Andreasen	Kommuneingeniør
Jørgen Jørgensen	Havneudvalgsformand
Kurt Evald Rasmussen	Medl. Havneudvalget (Fiskerne)
Henning Egmose	Medl. Havneudvalget (Fiskerne)
Christian Blom	Medl. Havneudvalget (LK-linien)
Erik Vinding	Havnefoged
Elsebeth Aagaard	Medl. udvalget for teknik og miljø
Hans Burcharth	AUC
Peter Frigaard	AUC
Kim Andersen	AUC
Troels Sørensen	AUC

På mødet præsenterede Hans Burcharth de hidtil opnåede resultater. Det blev konkluderet, at undersøgelserne omkring de bølgeabsorberende konstruktioner skulle koncentreres om stenkistekonstruktioner og ikke om tremmekonstruktioner. Dette skyldes, at isforholdene i havnen vil bevirke, at tremmekonstruktioner vil blive meget dyre. Ligeledes blev det besluttet at undersøge bølgeenergitransmissionen igennem en stenkiste tværmole, idet en sådan kunne være en løsning.

Den 6.10.1992 besigtigelse af modellen af Bagenkop Havn i AUCs laboratorier. På mødet deltog:

Erik Vinding	Havnefoged
Henning Pedersen	Havnefogedassistent
Michael Brorsen	AUC
Kim Andersen	AUC
Troels Sørensen	AUC

På mødet blev det konstateret, at modellen var opbygget korrekt mht. geometri og placering af absorberende konstruktioner. Erik Vinding nævnte dog, at bedding i bassin 1 og 'strand' i bassin 2 var lidt stejlere (ca. 1:4) på vanddybderne 1 meter til 3 meter. Hældningen på mindre vanddybder var korrekt modelleret 1:8.

I bassin 3 nævnte Erik Vinding, at der var opsat vandrette planker i vandlinien på broen ud i bassinet. 3 planker a 15 cm med mellemrum på ca. 10 cm (midterste planke i DV.).

Efter mødet blev modellen bragt i overensstemmelse med Erik Vindings iagttagelser.

Den 4.11.1992 foretoges besigtigelse af modelforsøg. Præsentation og diskussion af resultater. I mødet deltog:

Peter B. Andreasen	Kommuneingeniør
Jørgen Jørgensen	Havneudvalgsformand
Kurt Evald Rasmussen	Medl. Havneudvalget (Fiskerne)
Henning Egemose	Medl. Havneudvalget (Fiskerne)
Christian Blohm	Medl. Havneudvalget (LK-linien)
Erik Vinding	Havnefoged
Elsebeth Aagaard	Medl. udvalget for teknik og miljø
Helge Larsen	
Hanne Borum	
Jan Bønnelykke	
Bent Krøyer	
Anette Petersen	
Niels Dalgaard Andersen	

Lars Rasmussen	
Henrik Pedersen	
Hans Burcharth	AUC
Peter Frigaard	AUC
Philip Vestergaard	AUC
Troels Sørensen	AUC

På mødet blev modellen demonstreret og allerede opnåede resultater blev diskuteret.

Virkningen af at indlægge absorberende konstruktioner, og virkningen af tværmoler blev demonstreret.

Efter forslag fra Kurt Evald Rasmussen blev det besluttet at ombygge modellen og teste et nyt havne lay-out (her i rapporten kaldes det forsøgsopstilling 11.).

2 Konklusion og resume

Indledende konsekvensberegninger vha. en numerisk bølgemodel viste, at såfremt der blev indlagt 60-120 meter bølgeenergiabsorberende konstruktioner (refleksionskoefficienten af bølgehøjden var ca. 50 %) langs nogle eksisterende kajstrækninger, ville det være muligt at formindske bølgeuroen i de inderste bassiner til ca. halvdelen af den eksisterende bølgeuro.

Det blev herefter besluttet at udføre modelforsøg med forskellige bølgeenergiabsorberende konstruktioner. Modelforsøgene blev udført i to forskellige skalaforhold 1:10 og 1:50; skalaforhold 1:10 repræsenterer størst mulig model, og skala 1:50 repræsenterer havnemodellen. Denne fremgangsmåde blev valgt, fordi man vil få hydrauliske skaleringsfejl, hvis man blot geometrisk nedskalerer bølgeenergiabsorberende konstruktioner.

Først blev der udført modelforsøg i skala 1:10. refleksionskoefficienten blev målt som funktion af bølgeperiode og bølgeangrebsretning.

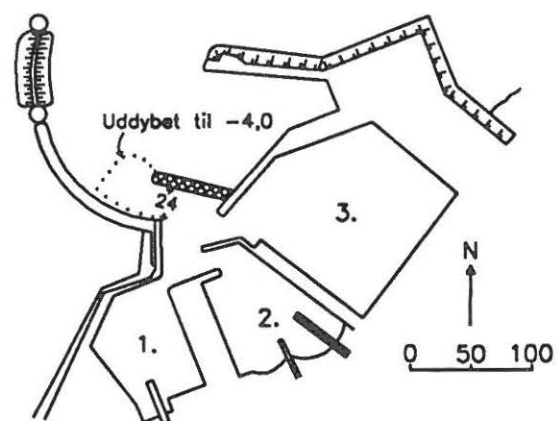
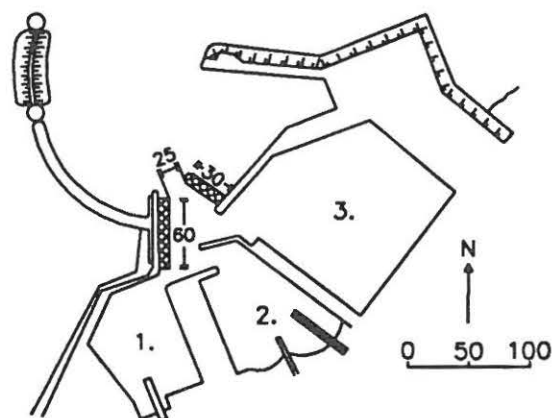
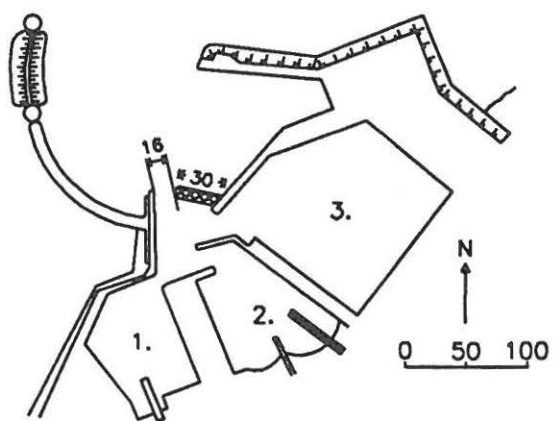
Det blev konstateret, at refleksionskoefficienten vokser, når bølgeindfaldsvinklen vokser. Dette er uheldigt, da de oprindelige forslag gik på en placering af de bølgeabsorberende konstruktioner i indsejlingen, hvor bølgeangrebsvinklen er meget stor.

Herefter blev der udført modelforsøg med bølgeenergiabsorberende konstruktioner i skala 1:50. Som forventet afveg resultaterne væsentligt fra resultaterne af forsøgene udført i skala 1:10. Formålet med forsøgene i skala 1:50 var at finde en bølgeenergiabsorberende konstruktion, hvis virkemåde (refleksionskoefficient) svarede til virkemåden af konstruktionen i skala 1:10 (prototype). Det blev konkluderet, at det ved empirisk tilpasning er muligt at opbygge en bølgeenergiabsorberende konstruktion i skala 1:50 med nogenlunde samme refleksionskarakteristika som målt i skala 1:10.

Der blev nu udført modelforsøg med den eksisterende havneudformning, og med 10 forskellige alternative løsninger.

Forsøgene viste, at det vil være meget svært, uden større ombygninger, at opnå bølgeuro i havnen svarende til kun ca. halvdelen af den eksisterende bølgeuro. På den anden side kan der med mindre ombygninger opnås ca. 40 % forbedring.

Tre forskellige alternative løsningsforslag (svarende til forsøgssopstilling 6, 9 og 11) vil kunne mindske bølgeuroen til ca $\frac{2}{3}$ af den eksisterende bølgeuro. De tre havneudformninger er vist i figur 1.



Figur 1. Havneudformninger med ca. 40 % mindsket bølgeuro.

3 Bølge- og vandstandsforhold

Undersøgelsen har afgrænset sig til at vurdere bølgeforholdene for bølger fra den erfaringsmæssigt værste sektor: 270 grader azimuth til 360 grader azimuth, dvs. vest - nord.

Bølgeforholdene på dybt vand ud for havnen er beregnet som vindgenererede bølger vha. fritstræksdiagrammer. Bølgeberegningen er baseret på vindmålinger fra Keldsnor Fyr i en 30 års periode.

Idet havnens følsomhed over for mindre ændringer i bølgeretningen skulle undersøges, er der beregnet bølgeparametre for hver 15 grader. Som grundlag for vurderingerne er det valgt at benytte nedenstående bølgedata, svarende til en overskridelsessandsynlighed på 12 timer/år.

Retning ° azimuth	H_s m	T_p sek.
270	2.03	5.6
285	1.98	5.5
300	1.53	4.6
315	1.49	4.6
330	1.45	4.5
345	0.52	2.5
360	0.42	2.2

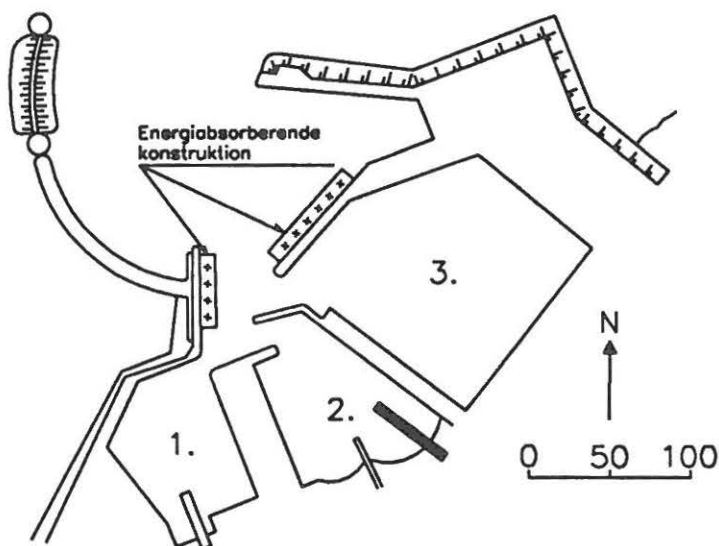
Tabel 1. *Bølgeparametre på 6 meters vanddybde udenfor Bagenkop Havn. Bølgerne svarer til en overskridelsessandsynlighed på 12 timer/år.*

I bilag 5.4 er der angivet en fuldstændig liste over bølgeparametrene som funktion af overskridelsessandsynligheden.

Det vides, at for vestlige vinde vil der forekomme lavvande i Bagenkop Havn.

4 Beregning af bølgefelter med numerisk model

I det følgende er indflydelsen af energiabsorberende konstruktioner i Bagenkop Havn vurderet på baggrund af en række beregnede bølgefelter, hvor bølgeretning, bølgeperiode og refleksionskoefficient blev varieret.



Figur 2. Placering af energiabsorberende konstruktioner ved numeriske beregninger.

4.1 Fysisk baggrund for den numeriske model

Bølgefeltet beregnet med en numerisk model baseret på 'mild slope'-ligningen:

$$\nabla (c \cdot c_g \cdot \nabla \eta) = \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$

hvor

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ er den to-dimensionale gradient operator

c er bølgenes udbredelseshastighed

c_g er bølgenes gruppehastighed

η er overfladeelevationen

t er tiden

Ved beregning af bølgefeltet med 'mild slope'-ligningen tages der automatisk hensyn til fænomenerne diffraktion, refraktion og shoaling. Metodens begrænsninger skyldes derfor antagelserne om *lineære, regelmæssige* bølger og *lille hældning* af havbunden, i praksis under 1 : 3.

Da virkningen af bølgebrydning imidlertid kan modelleres rimeligt nøjagtig, er den væsentligste ulineære effekt medtaget.

Endvidere vurderes det, at der kun blev introduceret uvæsentlige fejl som følge af kravet om lille bundhældning, da denne er mindre end 1 : 3 overalt i området.

Der er i al væsentlighed tale om et bølgeudbredelsesproblem, hvor fornuftige resultater for uregelmæssige bølger erfaringsmæssigt opnås ved at foretage en vægtning af resultater opnået med forskellige bølgeperioder.

Da de numeriske beregninger viste, at indflydelsen af bølgereflexionskoefficienten var langt større end indflydelsen af bølgeperioden (4,5 og 6 sek.) blev der ikke foretaget en vægtning af resultaterne opnået med forskellige perioder.

For at kunne sammenligne resultaterne fra den numeriske model med resultaterne af de fysiske modelforsøg, blev der i alle tilfælde beregnet en middelbølgehøjde i forskellige områder af [bassinerne](#).

Middelbølgehøjden blev beregnet ud fra middelværdien af bølgeenergien i området uden for havnemundingen.

Det blev endvidere forudsat, at vindretning og bølgenes udbredelsesretning var sammenfaldende på 6 m vanddybde udenfor havnen, idet afvigelserne er små.

4.2 Opbygning af numerisk model

'Mild slope'-ligningen blev løst numerisk med differensligning-metoden. Løsningen foregik skridtvis i tidsdomænet, og til hvert tidstrin beregnedes overfladeelevationen i knudepunkterne i et rektangulært net. Af hensyn til nøjagtighed og stabilitet blev der anvendt en netvidde på 1 m og et tidsskridt på 0.05 sek.

Modellens udstrækning var i alle tilfælde 400 m x 350 m, orienteret med den længste side i bølgenes udbredelsesretning på 6 m dybde. Bølgerne blev dannet af en pulserende liniekilde inde i modelområdet. Liniekilden var i alle tilfælde placeret 10 m fra den opstrøms rand. Bølgeenergien blev fuldt absorberet af såkaldte 'svampelag' på den opstrøms rand.

I modellen blev anvendt brydningskriteriet:

$$|\eta| \leq \eta_{max} = 0.071 L \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$$

hvor L er lokal bølgelængde og d er lokal vanddybde.

Var størrelsen af en beregnet elevation større end den lokale maksimale elevation, blev den pågældende elevation reduceret til den maksimale værdi.

Bundfriktion blev ikke medtaget i beregningerne. Det ville have resulteret i for små beregnede bølgehøjder, da tilførslen af energi fra vinden ikke kan medtages i denne type model.

4.3 Diskussion af resultater

Ved en placering af energiabsorberende konstruktioner som vist på figur 2, vil det være muligt at mindske bølgehøjderne i havnen til ca 25-80 % af de nuværende bølgehøjder, afhængigt af bølgeretning og bølgeperiode. En forudsætning for denne reduktion er imidlertid at det er muligt at bygge energiabsorberende konstruktioner med refleksionskoefficienter (bølgehøjde) på 50-70 %.

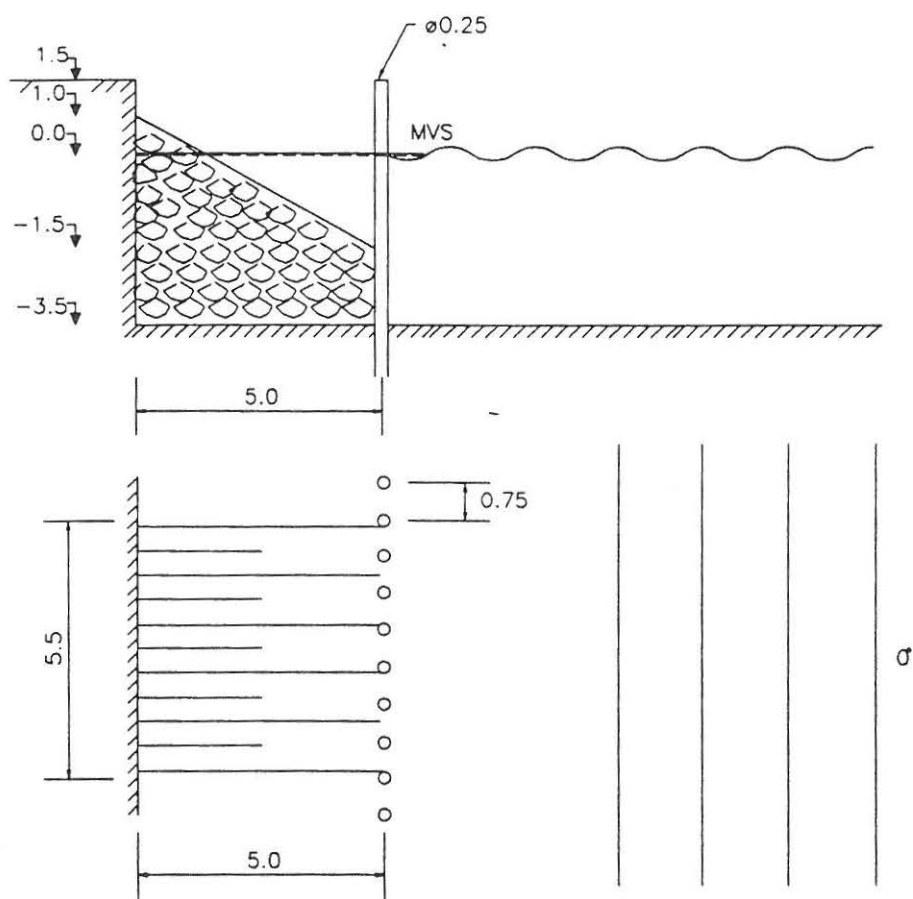
5 Beskrivelse af refleksionsforsøg

Først blev der udført refleksionsforsøg i skala 1:10, hvilket er det største skalaforhold, som det var muligt at have i laboratoriet.

Der blev udført forsøg med tre forskellige type absorberende konstruktioner, nemlig pælerækker, plankevægge og stenkister.

refleksionskoefficienten (bølgehøjde) blev målt som funktion af bølgeperiode og bølgeangrebsretning. Resultaterne er gengivet i bilag 1.

Efter mødet den 17.6.1992 blev det besluttet at den eneste realistiske konstruktion ville være en stenkiste som er modstandsdygtig overfor is. Det blev herefter besluttet at koncentrere målingerne om en stenkiste på 5 meters bredde, hvor stenene blev oplagt med en hældning 1:2. Konstruktionen er vist på figur 3.



-Alle mål i meter.

Figur 3. Bølgeabsorberende konstruktion

Efterfølgende blev der udført forsøg i skala 1:50. Der blev anvendt et skalaforhold på 1:50, fordi på indeværende tidspunkt var det planen at bygge den fysiske model i skala 1:50, hvilket senere blev ændret til skala 1:40.

refleksionskoefficienten (bølgehøjde) blev målt som funktion af bølgeperiode og bølgeangrebsretning for konstruktionen vist i figur 3. Resultaterne er gengivet i bilag 3. Som ventet viste det sig, at pga. hydrauliske skalaeffekter blev der nu målt nogle andre refleksionskoefficienter.

Hovedformålet med refleksionsforsøgene var at finde en egnet konstruktionstype, dels til prototype og dels til anvendelse i modellen, så det blev besluttet at undersøge om ikke det ville være muligt at modellere refleksionskarakteristika fra konstruktionen vist i figur 3 noget bedre.

Efter afprøvning af nogle andre konstruktionstyper blev det valgt at anvende en stenkiste med ekstra store sten i modellen.

6 Beskrivelse af fysisk model og forsøgsmetodik

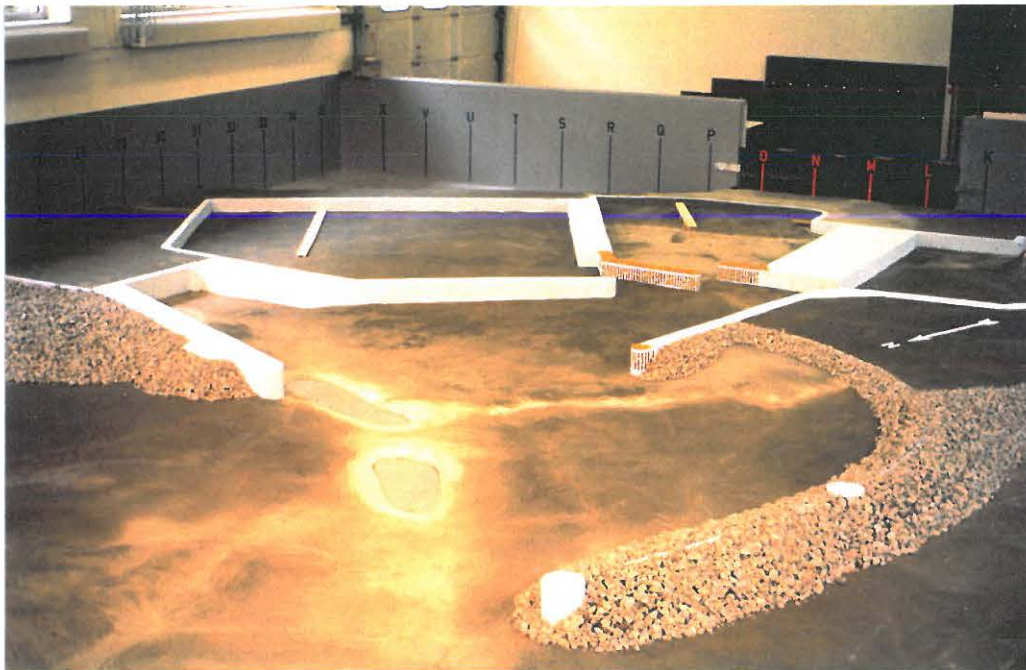
Modellen blev opbygget i målestoksforholdet 1 : 40 af hensyn til pladsforholdene i bassinet.

Da bølgeforholdene omkring havnen bl.a. er bestemt af vanddybderne, blev bundtopografien i området genskabt i modellen.

Grundlaget for vanddybderne uden for havnen har været pejlinger foretaget af Sydlangelands Kommune.

Bunden var modelleret korrekt foran havnen indtil kote -6 m.

Vestre dækmole blev udført med kronekote $+1.5$ meter, svarende til, at der forekom overskyl af kronen for de højeste bølger fra de vestlige retninger.



Figur 4. Foto af fysisk model.

Alle forsøgene blev udført ved normal vandstand.

Forsøgene blev udført med to-dimensionale uregelmæssige bølger modelleret efter JONSWAP-spektret og i øvrigt i henhold til prototype bølgekarakteristika som angivet i afsnit 3.

Det benyttede JONSWAP-spectrum er givet ved

$$S(f) = \frac{1.4}{\gamma} \frac{5}{16} H_S^2 f_p^4 f^{-5} \gamma^\alpha \exp \left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right)$$

hvor

$$\alpha = \exp \left(-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma_f^2 f_p^2} \right)$$

f_p = spidsfrekvens

$\sigma_f = 0.10$ for $f \leq f_p$

$\sigma_f = 0.50$ for $f > f_p$

$\gamma = 3.3$

Bølgeprogram for modellforsøgene

Bølgeretning	H_s (model) (cm)	T_p (model) (sek)	H_s (prototype) (meter)	T_p (prototype) (sek)
270°	2.5/4.0/9.0	0.63/0.95	1.0/1.6/3.6	4.0/6.0
285°	2.5/4.0/9.0	0.63/0.95	1.0/1.6/3.6	4.0/6.0
300°	2.5	0.63/0.95	1.0	4.0/6.0
315°	2.5	0.63/0.95	1.0	4.0/6.0
330°	2.5	0.63/0.95	1.0	4.0/6.0
345°	2.5	0.63/0.95	1.0	4.0/6.0
360°	2.5	0.63	1.0	4.0

Tabel 2. Bølger anvendt i forsøgene.

Det ses, at de signifikante bølgehøjder og peakperioderne i modellen er forskellig fra bølgeparametrene angivet i kapitel 3. For at mindske effekten af ikke lineariteter, og for bedre at kunne interpolere imellem forskellige måleresultater, hvis der eventuelt skulle beregnes bølgeruro for flere forskellige overskridelsessandsynligheder, blev forsøgene udført med flere forskellige bølger, som angivet i tabel 2.

Alle forsøgene på nær et blev udført med perioderne $T_p = 0.63$ sek og $T_p = 0.95$ sek for at undersøge bølgeperiodens indflydelse på bølgeuroen.

I samtlige målepunkter blev bølgeforholdene registreret ved spektralanalyse af vand-spejlsvariationerne. Herved kunne adskillelse imellem kortperiodiske og langperiodiske bølger foretages.

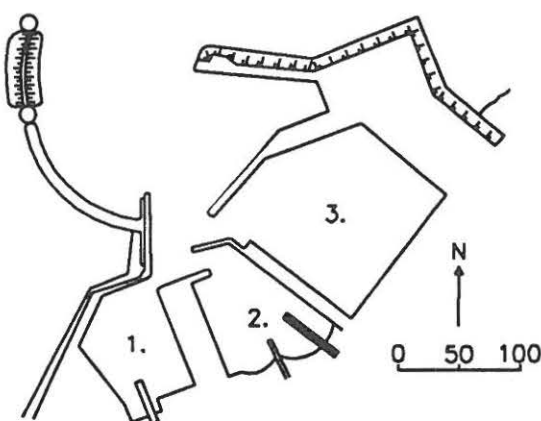
Når der ses bort fra langperiodiske bølger, skønnes det, at den maksimale signifikante bølgehøjde ved liggepladserne ikke bør overstige $H_s = 0.4$ m for store fiskefartøjer og $H_s = 0.2 - 0.3$ m for mindre fiskefartøjer og lystbåde.

Hvad angår tilladelige langperiodiske bølger kan ikke umiddelbart gives grænseværdier for højder, idet fartøjernes reaktion i høj grad afhænger af fortøjningsmåde samt hastighed og perioden af den strøm, som de langperiodiske bølger genererer langs kajerne. Kun omfattende modelforsøg i stor skala omfattende hele havnen samt fortøjede modelskibe kan give svar på dette spørgsmål.

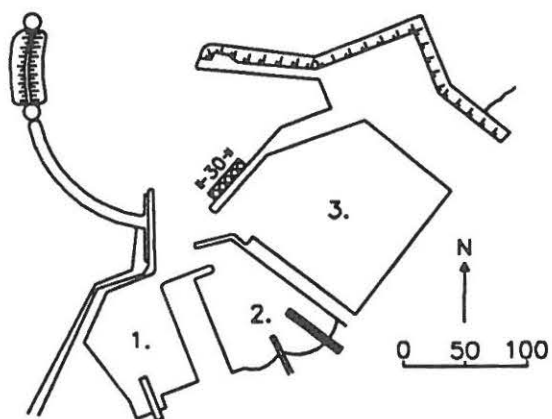
Forsøgsresultaterne beskriver kun de kortperiodiske bølger. Der er i modellen ikke observeret langperiodiske bølger.

6.1 Forsøgsopstillingerne

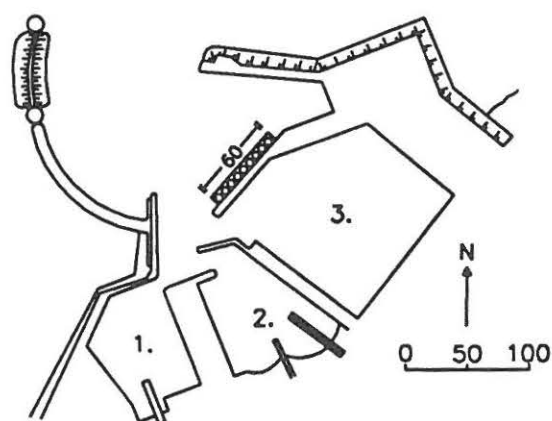
I den efterfølgende figur vises de 11 forskellige forsøgsopstillinger. En nøjere beskrivelse af opstillingerne findes i bilag 4.



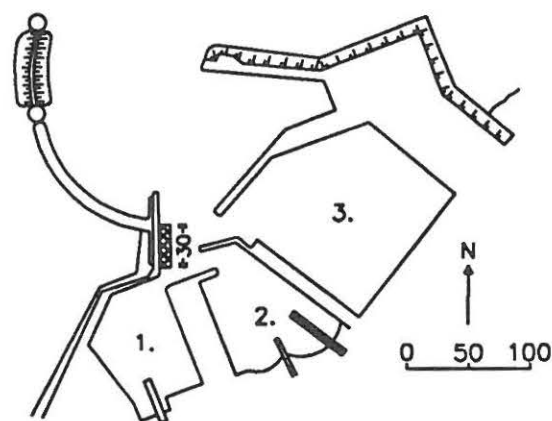
Figur 5 a Eksisterende havn



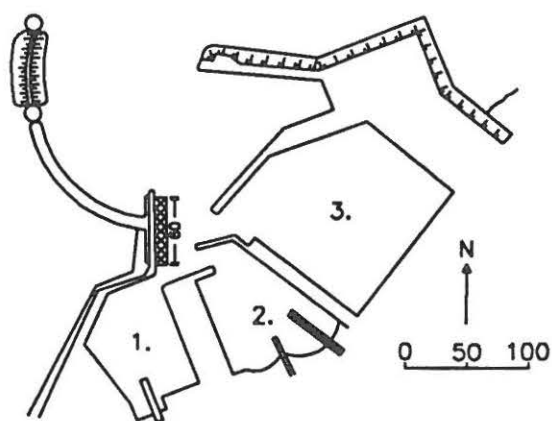
Figur 5,b Forsøgsopstilling 2 har en 30 m lang tømmerkiste i forhavnen



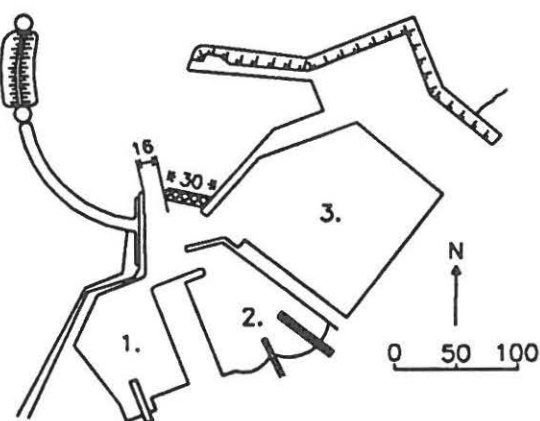
Figur 5,c Forsøgsopstilling 3 har en 60 m lang tømmerkiste i forhavnen



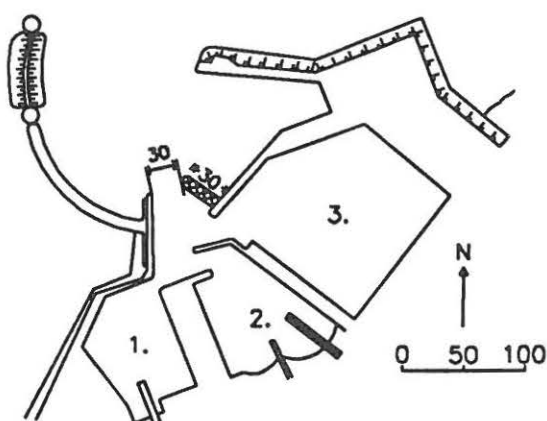
Figur 5,d Forsøgsopstilling 4 har en 30 m lang tømmerkiste ved indsejlingen



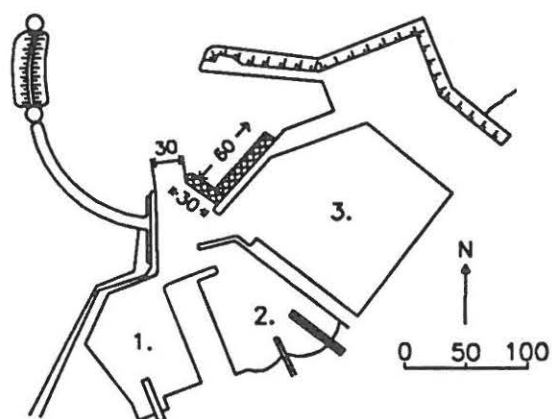
Figur 5,e Forsøgsopstilling 5 har en 60 m lang tømmerkiste ved indsejlingen



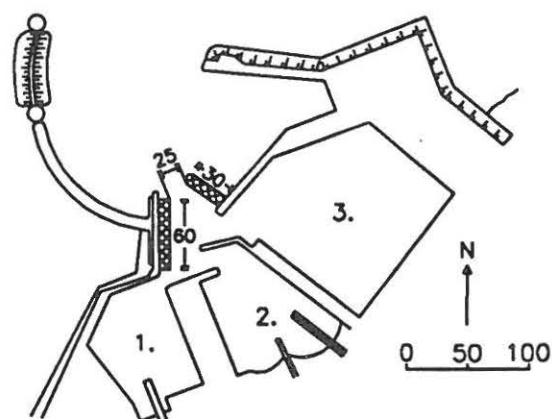
Figur 5,f Forsøgsopstilling 6. Indsejlingen til inderhavnen er indsnævret til 16 m vha. brokaj.



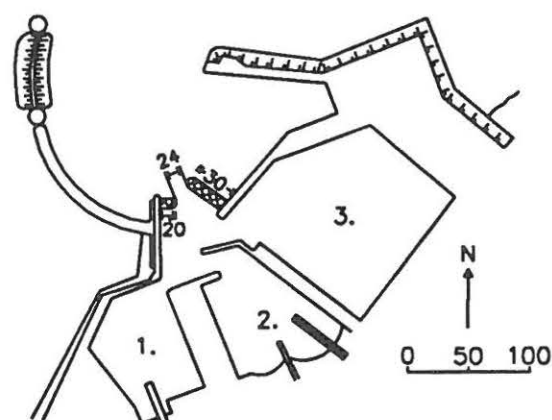
Figur 5,g Forsøgsopstilling 7. Indsejlingen til inderhavnen er indsnævret til 30 m vha. brokaj.



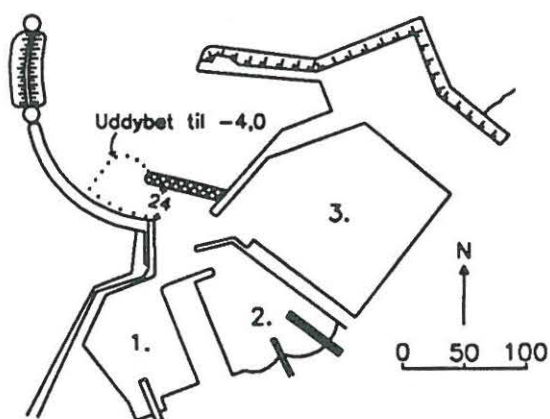
Figur 5,h Forsøgsopstilling 8. 60 m tømmerkiste og 30 m brokaj



Figur 5,i Forsøgsopstilling 9. 60 m tømmerkiste og 30 m brokaj



Figur 5,j Forsøgsopstilling 10. Indsejlingen til inderhavnen er indsnævret til 24 m vha. to brokajer.



Figur 5,k *Forsøgsopstilling 11. Indsejlingsbredden til inderhavnen reduceret til 24 m efter fjernelse af eksisterende kaj og bygning af ny brokaj*

6.2 Forsøgsresultater

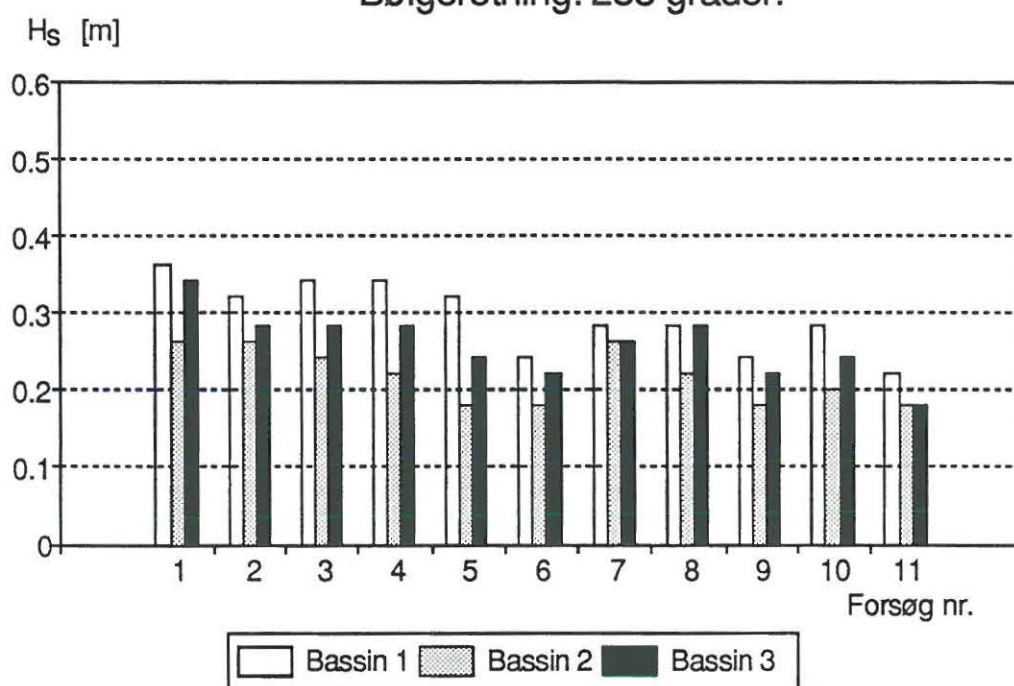
På hvert enkelt bilag i bilagsmappen er havneudformning, bølgeforhold ud for havnen på 7 meters vanddybde samt målte signifikante dæmpningskoefficienter rundt i havnen angivet.

På de følgende sider opsummeres resultaterne.

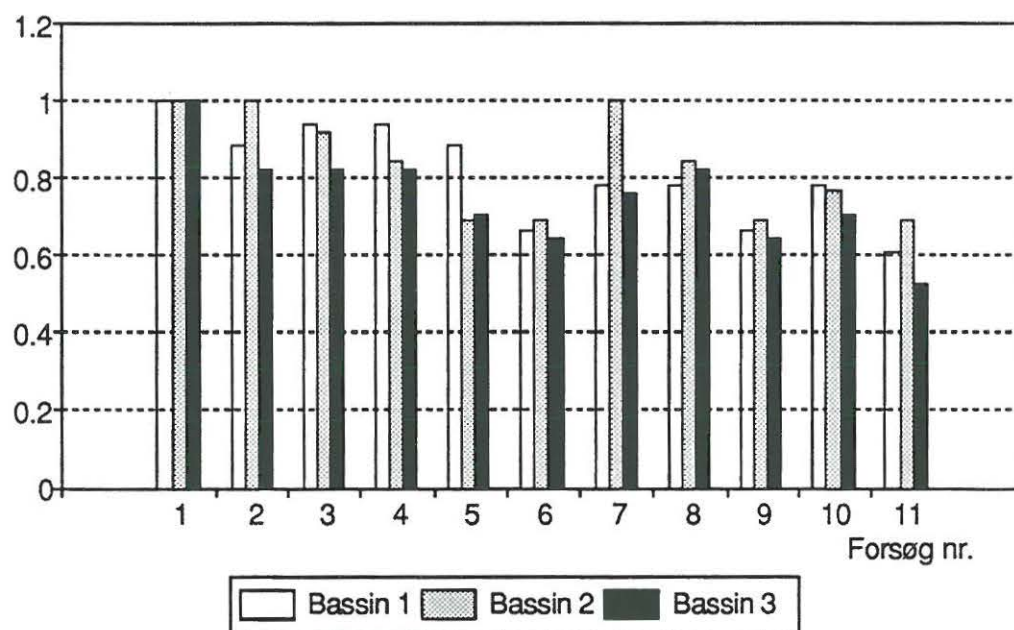
Alle viste resultater er middelværdierne af de signifikante bølgehøjder i de enkelte bassiner for de forskellige undersøgte vindretninger. Den øverste figur på hver side viser den signifikante bølgehøjde i bassinerne. Forsøgsnummeret angiver i hvilken havneudformning, der er målt.

Den nederste figur er indekseret således, at bølgeuroen i den eksisterende havn (opstilling 1) er sat til 100.

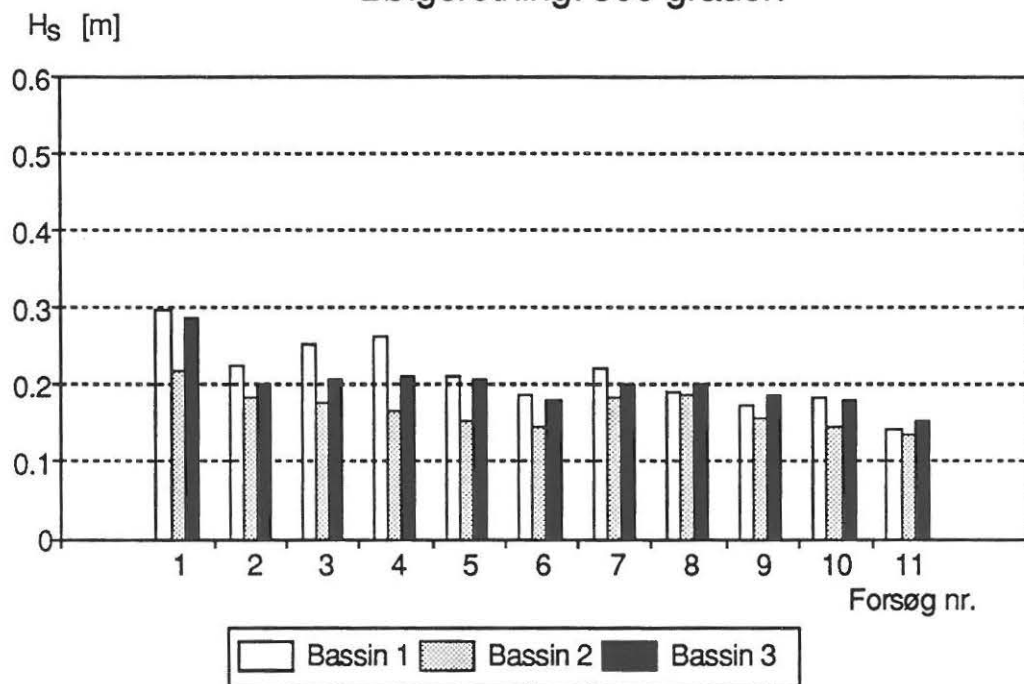
Middelbølgehøjder i inderhavn. Bølgeretning: 285 grader.



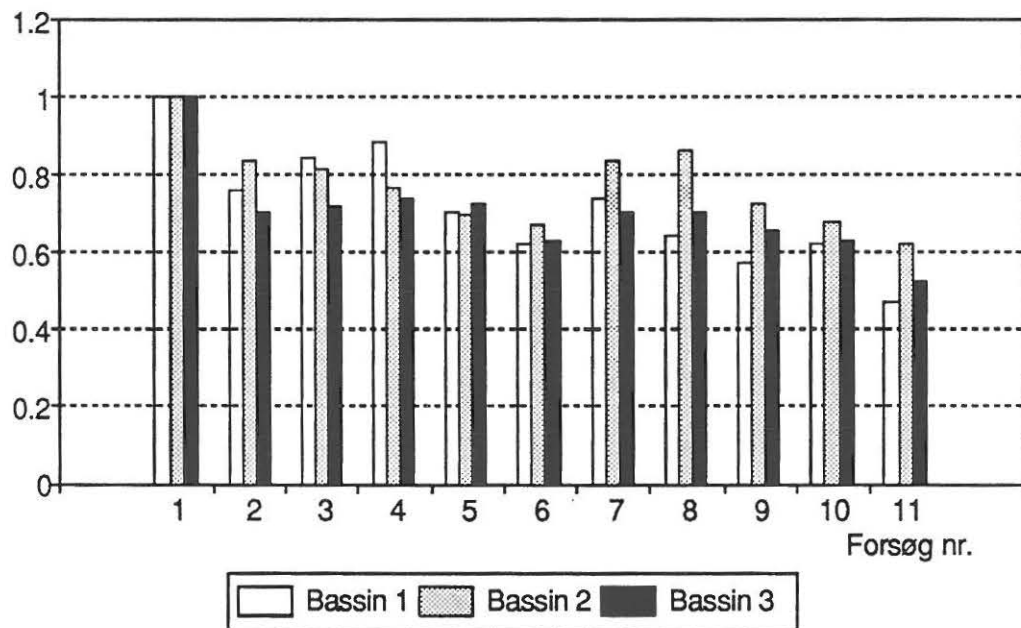
Indeksværdier for bølgeuro i inderhavn. Bølgeretning: 285 grader.



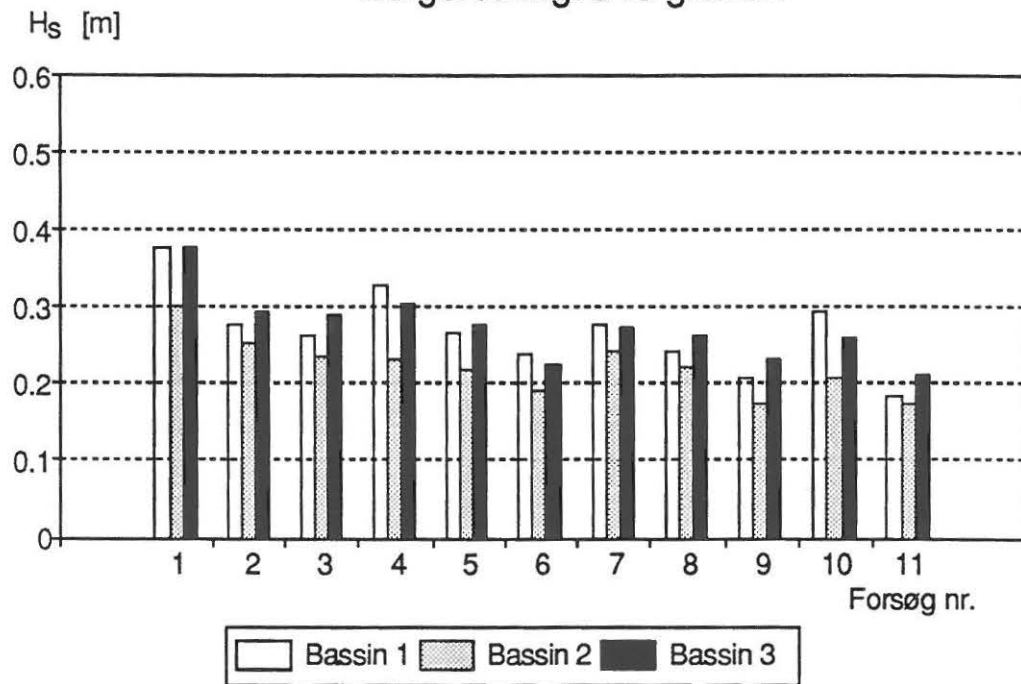
Middelbølgehøjder i inderhavn. Bølgeretning: 300 grader.



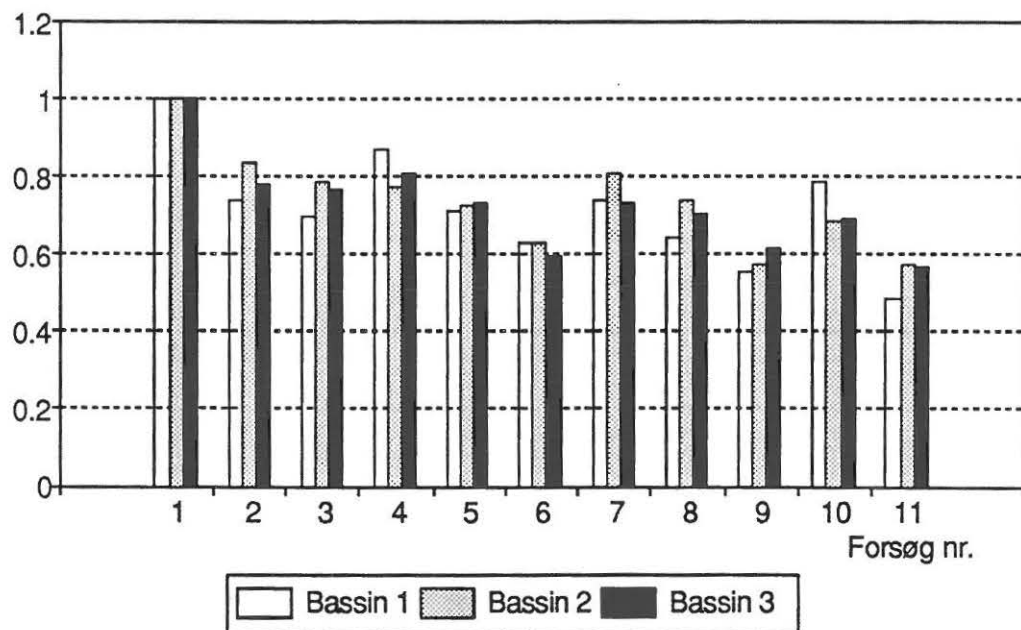
Indeksværdier for bølgeuro i inderhavn. Bølgeretning: 300 grader.



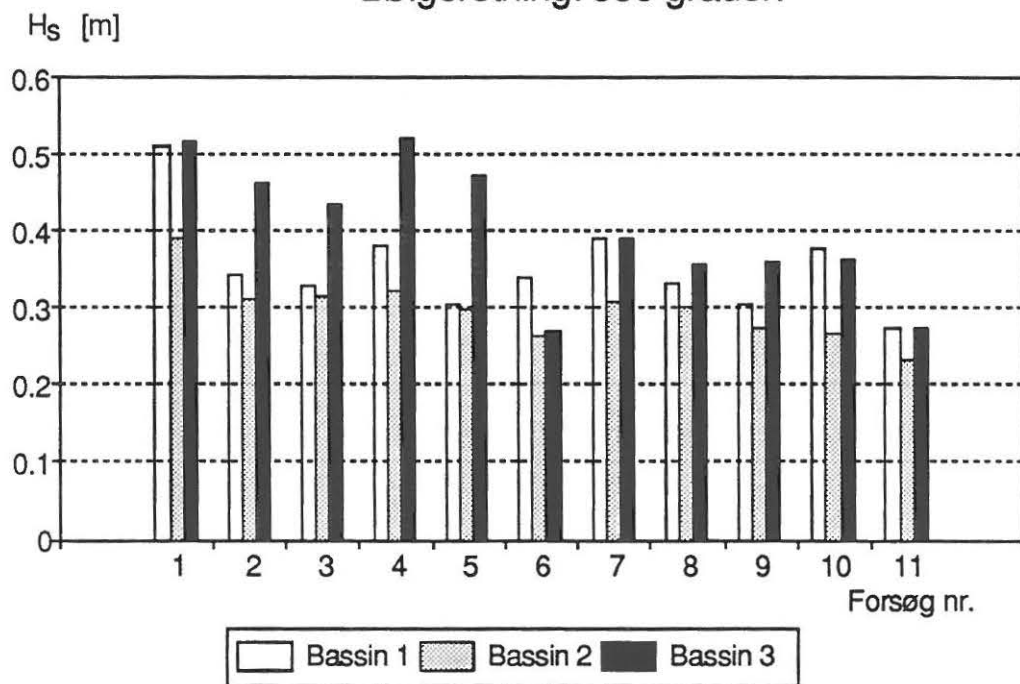
Middelbølgehøjder i inderhavn. Bølgeretning: 315 grader.



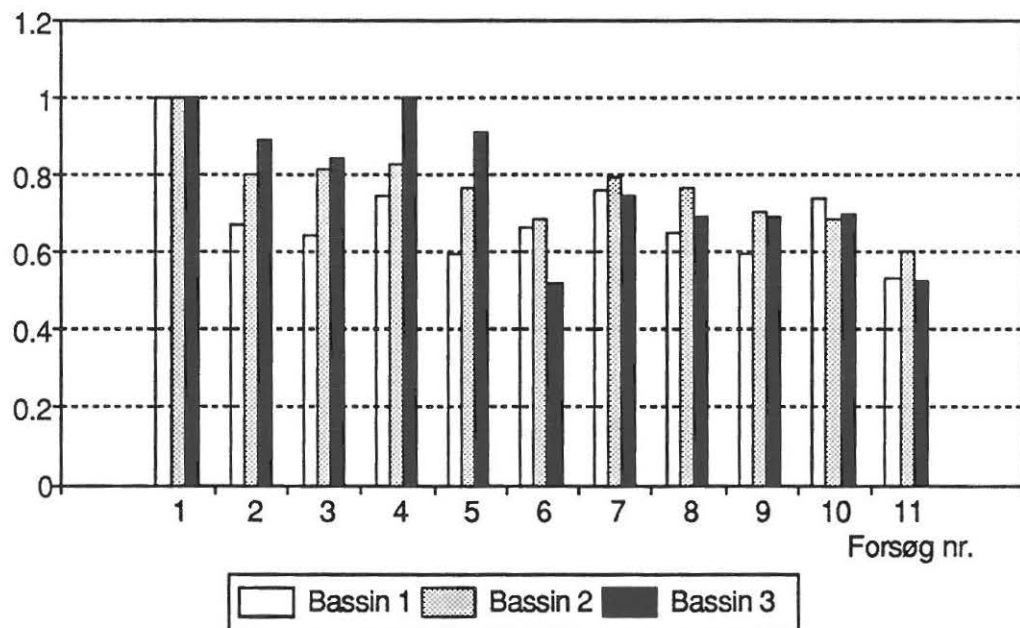
Indeksværdier for bølgeuro i inderhavn. Bølgeretning: 315 grader.



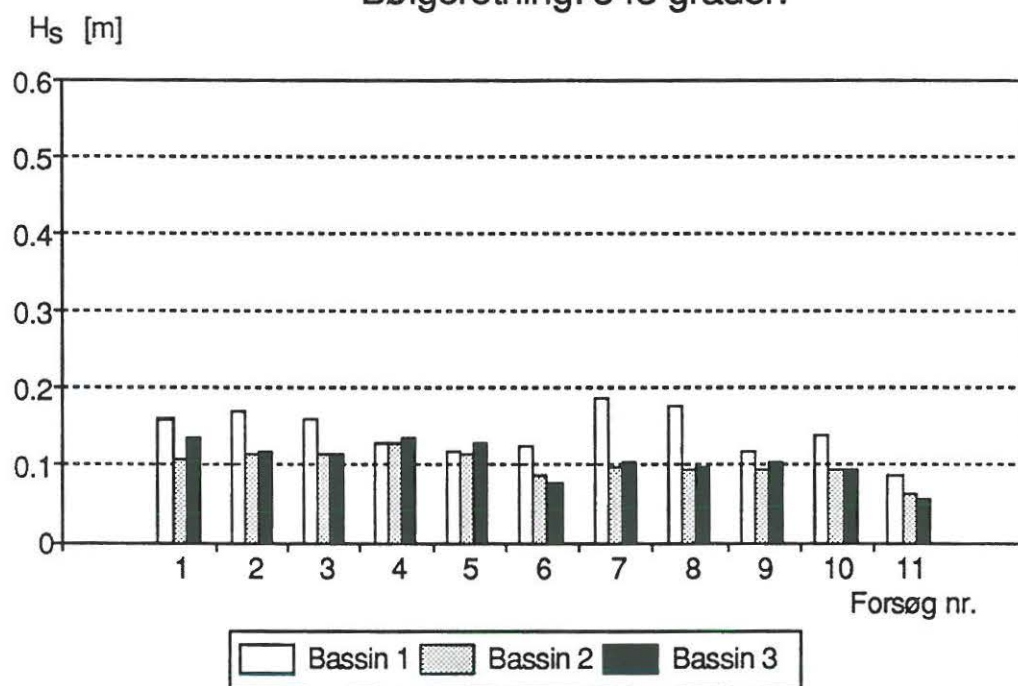
Middelbølgehøjder i inderhavn. Bølgeretning: 330 grader.



Indeksværdier for bølgeuro i inderhavn. Bølgeretning: 330 grader.



Middelbølgehøjder i inderhavn. Bølgeretning: 345 grader.



Indeksværdier for bølgeuro i inderhavn. Bølgeretning: 345 grader.

